

CR의 송신 전력 제어를 위한 게임 이론 연구

Game Theory for Transmission Power Control of Cognitive Radio

황인관 · 이령경 · 조해근 · 임연준 · 고은경 · 송명선*

In-Kwan Hwang · Ryoung-Kyoung Lee · Hae-Keun Cho · Yeon-Jun Lim · Eun-Kyoung Ko · Myoung-Sun Song*

요 약

본 논문에서는 CR(Cognitive Radio)의 가장 적합한 인공지능 기술로 주목받고 있는 게임 이론을 전력 제어 방식에 적용해 CDMA 시스템 기반의 사용효율과 효용에 대한 성능 평가 결과를 제시하였다. 사용자와 네트워크 동시 최적화를 위한 효용함수식을 정의하였으며 모의실험을 통해 FOM(Figure of Merit)과 형평성(Fairness)에서 기존의 페루프 전력 제어 방식보다 월등한 성능을 입증하였다. 또한 게임 이론을 적용한 전력 제어 방식은 통신 환경을 인지하고 연산하여 적합한 최적의 서비스를 제공하는 CR의 여러 분야에 확장 적용 가능성을 제시하였다.

Abstract

In this paper, the game theory based power control for CDMA system is studied, which has attained intensive interest as a core artificial intelligent technology for cognitive Radio and its efficiency is evaluated using performance metrics such as system throughput and fairness. Utility Function for joint user centric and network centric power control is defined and simulation results show that game theory based power control is far better than closed loop power control. The contribution of this paper is to formalize the game theory based power control toward the cognitive radio that recognizes and adapts to the radio communication environments.

Key words : Game Theory, Cognitive Radio, Power control, CDMA

I. 서 론

무선통신 환경에서의 데이터 서비스에 대한 수요가 증가함에 따라 능률적이며 효과적인 무선 자원 관리가 필요하게 되었으며, 주파수 대역 부족 문제를 해결하기 위한 많은 대안이 나오고 있다. 또한 다양한 통신 시스템들을 수용하는 통합망으로 발전하고 있는 제4세대 통신 시스템에서는 인지 기능이 부여된 효율적인 단말기가 요구되고 있다. CR은 고갈되어 가는 주파수 자원의 개발 측면뿐만이 아니라 실질적인 유무선 통합을 이루기 위해서 선행되어야

하는 연구임이 분명하다.

본 연구에서는 CR의 핵심기술로 주목 받고 있는 게임 이론을 전력 제어 방식에 적용함으로써 전체 시스템의 간섭을 줄이고 각 단말기의 과도한 전력 사용에 페널티를 줌으로써 성능을 향상시켰다. 또한 기존 CDMA 시스템의 페루프 전력 제어 방식이 가지고 있는 문제점인 형평성과 효용에서 더 나은 성능을 보임을 입증하였다.

2장에서는 게임 이론에 대하여 정리하고 이를 적용한 전력 제어 시스템 모델을 구체적으로 제안한다. 3장에서는 모의실험을 통해 기존의 전력 제어

*이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원 및 한국전자통신연구원의 위탁연구비 지원에 의하여 연구되었음.

충북대학교 전파공학과(Department of Radio Engineering, Chungbuk National University)

*한국전자통신연구원(Electronic and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 20070209-024

· 수정완료일자 : 2007년 3월 9일

시스템과 게임 이론을 적용한 전력 제어 시스템의 성능을 비교 및 분석하고 4장에서는 결론을 맺는다.

II. 게임 이론 기반 전력 제어 알고리즘

2-1 게임 이론

게임 이론은 경쟁 주체가 상대방의 행동을 고려하여 자신의 이익을 효과적으로 달성하기 위한 수단을 합리적으로 선택하는 행동을 수학적으로 분석하는 이론이다. 이 게임 이론은 2차 세계대전 이후 급속히 발전하면서 전쟁은 물론 국내의 정치, 경제, 경영과 우리 일상생활에도 폭넓게 적용돼 왔다. 이처럼 게임 이론이 자리 매김을 하는데 내쉬 균형(Nash equilibrium)이 중요한 촉매 역할을 했다. 자신의 선택이 어떻게 상대방의 결정에 영향을 미치고 역으로 상대방의 선택이 자신에게 어떤 영향을 미치는가를 감안해 게임 참여자가 결정을 내리게 된다. 이런 과정을 통해 참여자들 모두가 상대방이 내린 결정 선택하에서는 자신의 선택이 최선이라고 여기는 결과에 이르면 이를 내쉬 균형에 도달했다고 본다. 이런 게임 이론이 CR의 적합한 인공 지능 기술로 주목을 받고 있으며 여러 많은 논문들이 발표되었다^[1].

2-2 게임 이론의 적용

각 단말기의 목적은 적은 송신 전력으로써, 사용 효율을 최대로 하는 것이다. 높은 전력 소비는 배터리의 수명을 감소시키고, 결국 다른 co-channel 링크에 간섭을 일으키게 된다. 그리하여 식 (1)과 같이 효율함수식이 정의된다^[2]. 식 (1)은 송신 전력을 크게 사용할수록 사용효율은 증가하고 또한 이에 따른 페널티도 증가하도록 이루어졌다.

$$U_i(P, \gamma_i) = \frac{T_i}{P_i} - KP_i^q \quad (1)$$

첫 번째 항은 전력 대비 사용효율을 나타낸 것이고, 두 번째 항은 페널티 함수(penalty function)를 나타낸 것으로 단말기 i 에 할당된 송신 전력 P_i 의 함수가 된다. 인덱스 q 는 송신 전력의 과다 사용에 대한 페널티를 지수로 나타낸 것이다. 각 단말기들은 자신의 사용효율을 최대로 하기 위해 송신 전력을 키우려는 반면 다른 사용자에게 미치는 간섭에 대한

페널티 항의 값에 따라 최적화된 효율함수를 얻게 된다.

2-3 내쉬 균형 수렴 방법

단말기 i 는 다른 링크의 간섭이 증가함에 따른 코스트를 고려하여 송신 전력을 증가시킴으로 사용효율이 최대가 되도록 시도한다. 또한 각 단말기들은 전력 레벨에 대한 선택권을 갖고 있다. 단말기 i 의 전력 레벨 집합 $P_i = \{p | p \in [P_{i, \max}, P_{i, \min}]\}$ 는 연속적이며 또한 닫혀 있다.

· 1 단계

각 사용자 $i \in I$ 는 이전 게임에서 주어진 $(P_j)_{j \in I(i)}$ 와 $P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max}$ 를 기반으로, 식 (2)으로부터 송신 전력을 갱신시키며, 처음의 초기 상태 전력은 $(P_j)_{j \in I}$ 로 가정한다. 사용자 i 의 최적화 루틴 결과는 사용자 $(i+1)$ 의 루틴에 초기 조건으로 이용된다.

$$P_{i, eqm} = \max_{P_i} U_i(P_i, P_{-i}, \gamma_i), \quad i \in I \quad (2)$$

· 2 단계

$n-1$ 번째 루프와 n 번째 루프의 마지막을 포함하는 $|p_i(k+1) - p_i(k)|$ 의 변화가 무시할 정도로 작으면, 내쉬 균형으로 수렴하는 것으로 보고 게임을 종료시킨다.

III. CDMA 시스템의 게임 이론 기반 전력 제어

단말기는 i 의 SIR(Signal to Interference Ratio) 값은 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i(P) = \frac{p_i}{\sum_{j \neq i} G_j p_{ji} + N_0 W + I_{oc}} \quad (3)$$

여기서 G 는 역확산에 따른 간섭의 가중치이며, $N_0 W$ 는 채널잡음, I_{oc} 는 다른 셀로부터 받는 간섭을 나타낸다. $p_{j,i}$ 는 단말기 i 에 대한 다른 단말기들의 간섭 전력을 의미한다.

$$T_i(P) = \frac{L}{M} R_i f(\gamma_i(P)) \quad (4)$$

사용효율에 대한 식 (4)를 정의할 수 있다. M 은 한 프레임 전체 비트, L 은 정보 비트, R_i 는 데이터 전송률을 나타낸다. $f(\cdot)$ 는 efficiency 함수로 $f(\gamma_i(P))$

$= [1 - 2BER(\gamma_i(P))]^M$ 로 정의한다.

효용함수는 U_i 라 하며, 전력 P 는 효용함수에 적용시켜 최적의 전력을 선택할 수 있도록 하기 위한 벡터 값으로 $P = (p_1, \dots, p_N)$ 과 같이 나타낸다. 최적의 처리량을 갖도록 하는 전송 전력을 선택하기 위하여 효용함수를 식 (5)와 같이 제안한다.

$$U_i(P) = \frac{T_i(P)}{P_i} - K \left(\frac{P_i}{P_{req}} \right)^q \quad (5)$$

식 (5)의 첫 번째 항은 소비 전력 당 처리량을 의미하며, 두 번째 항은 과도한 전송 전력에 대한 패널티 함수를 의미한다. P_i 는 i 단말기의 전송 전력을 의미하며, P_{req} 는 목표 BER이 10^{-4} 을 얻기 위해 요구되는 전송 전력이다. 즉, P_i 가 P_{req} 보다 큰 값으로 송신을 원하는 경우에는 다른 링크 간섭에 대한 패널티를 감수해야 한다. 이때 지수 q 와 가중치 K 는 모의실험을 통해 최적화 하였다.

각각의 단말기는 공동 채널의 다른 단말기에게 간섭을 최소화 하면서 자신의 처리량을 최대화 하는 전송 전력을 선택하게 되며 내쉬 균형으로 수렴하는 지점에서 모든 단말기는 형평성을 만족하는 전력 제어 상태에 이르게 된다. 여기에서 내쉬 균형에 수렴하도록 하기 위하여 그림 2와 같은 알고리즘을 사용하였다.

IV. 모의 실험 결과

모의실험을 위한 CDMA 시스템 변수는 표 1과 같다. 단말기의 전송 전력이 수신되었을 때의 전력에 대한 손실을 계산하기 위해 전파 손실 환경은 자유 공간 모델을 사용하였다^[3]. d 는 단말기와 기지국과의 거리, λ 는 신호의 파장을 나타낸다.

$$Loss = 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (6)$$

단말기는 육각모양 셀 안에 랜덤하게 위치하고 있으며 기지국은 셀 중심에 있다고 가정한다^[4].

그림 2는 각 단말기의 전력에 따른 효용함수값의 변화를 표현한 것이다. 볼록(concave)한 형태를 가지며 효용함수의 값이 최대값을 갖는 지점의 전력을 선택하게 된다. 이때 선택되는 전력은 반복 횟수에 따라 그림 3에서와 같이 변화하면서 내쉬 균형에 수

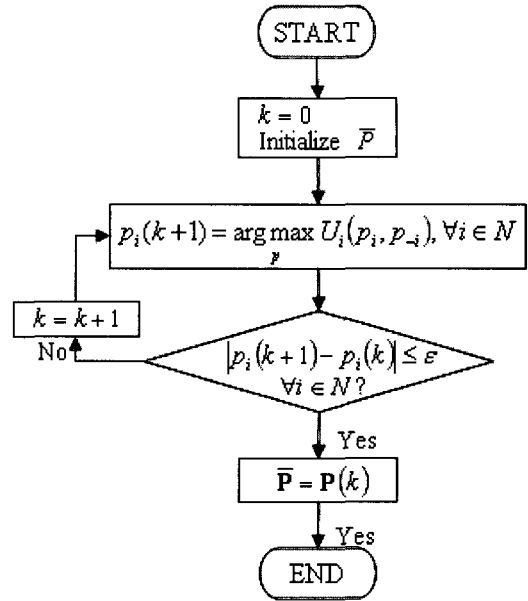


그림 1. 내쉬 균형 알고리즘
Fig. 1. Nash equilibrium algorithm.

표 1. CDMA 시스템 변수 및 값
Table 1. CDMA system parameters and values.

Parameter	Value
Chip rate	1.2288 Mcps
Data rate	9,600 bps
Carrier frequency	1.78 GHz
Processing gain	21.1 dB
Cell coverage	13 Km
Max EIRP	23 dBm
Target E_b/N_0	7 dB
Total number of bits	96 bits/frame
Number of information	88 bits/frame
Frames	20 ms
Thermal noise density	-171 dBm/Hz
Data slot per frame	10

렴하게 된다. 전력에 의한 처리량과 SIR은 그림 4와 그림 5에 나타내었으며, 대부분의 단말기가 반복 횟수 2번째 만에 수렴하게 됨을 알 수 있다.

성능 평가 지수 FOM은 다음과 같이 정의된다. FOM1은 사용 전력 당 시스템 사용효율의 링크에 의

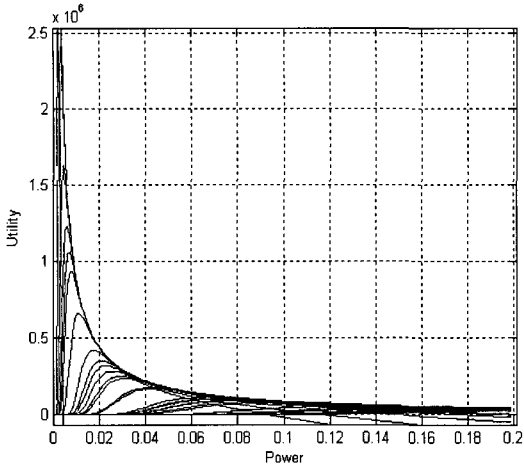


그림 2. 전력에 따른 효용함수 값
Fig. 2. Utility vs power curves.

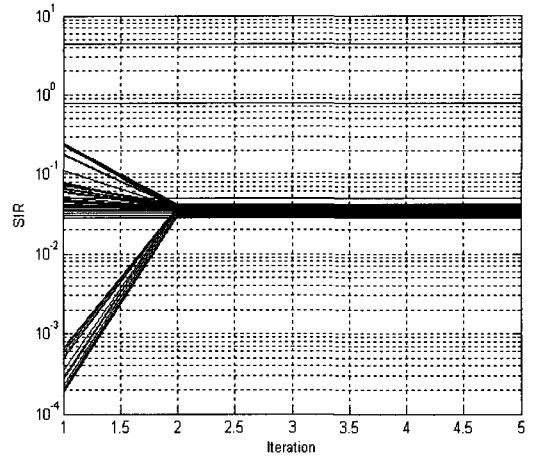


그림 4. 반복 횟수에 따른 SIR 값의 수렴
Fig. 4. SIR convergence vs iteration.

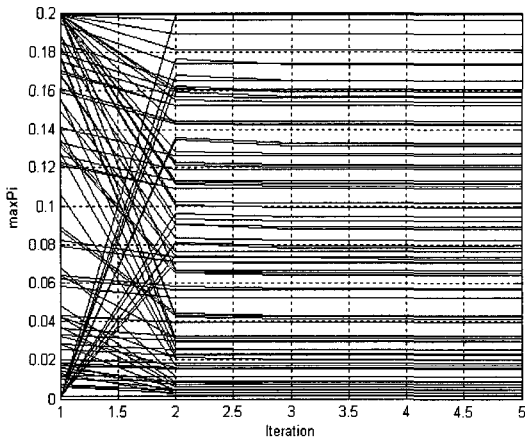


그림 3. 반복 횟수에 따른 전력의 수렴
Fig. 3. Power convergence vs iteration.

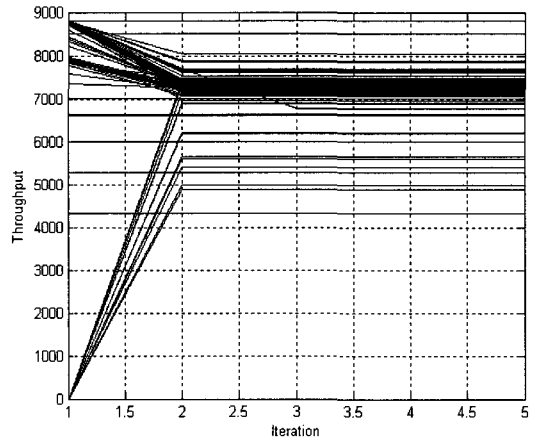


그림 5. 반복 횟수에 따른 처리량의 수렴
Fig. 5. Throughput convergence vs iteration.

해 소비된 최고 전력의 부분합에 대한 비율이다. FOM2는 시스템 사용효율과 소비된 최고 전력부분합 및 최대 사용효율 A_{max} 에 대한 차로 정의된다.

FOM3은 시스템 사용효율이다. FOM은 큰 값을 가질수록 시스템 성능이 좋은 것으로 판별할 수 있으며, 세 가지 경우의 FOM으로 시스템 성능 차이를 여러 형태로 확인하였다.

$$FOM1 = \frac{\sum_i T_i}{\sum_i P_i / P_{max}} \quad (7)$$

$$FOM2 = \sum_i T_i - A_{max} \sum_i \frac{P_i}{P_{max}} \quad (8)$$

$$FOM3 = \sum_i T_i \quad (9)$$

형평성 평가를 위한 Shannon의 균등도 지수로 표현하면 식 (10)과 같다. Shannon 지수는 0에서 최대 1까지의 값을 갖는다. 완벽하게 균등하면 1의 값을 갖고 0은 독점 영역을 나타낸다.

$$E_H = \frac{H}{\max H} \quad (10)$$

여기서 $H = -\sum q_i \log(q_i)$, $\max H = \log N$ 을 나타

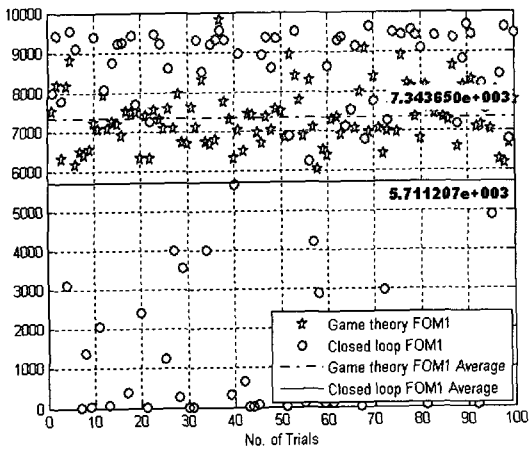


그림 6. 게임 이론 성능 평가(FOM1)
Fig. 6. Performance of game theory(FOM1).

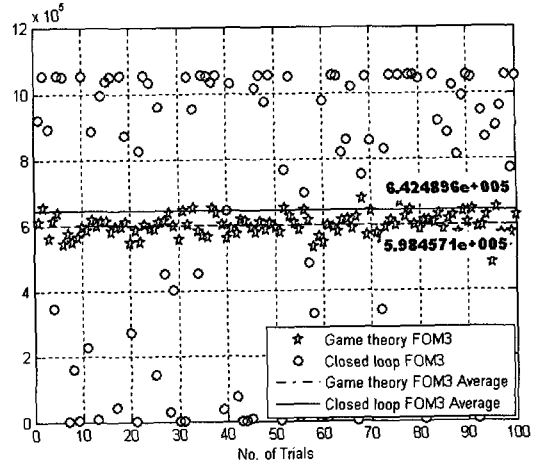


그림 8. 게임 이론 성능 평가(FOM3)
Fig. 8. Performance of game theory(FOM3).

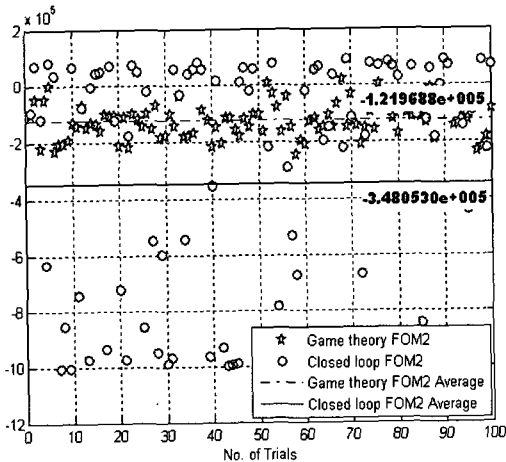


그림 7. 게임 이론 성능 평가(FOM2)
Fig. 7. Performance of game theory(FOM2).

낸다. N 명의 사용자의 사용효율 T_1, T_2, \dots, T_N 사용자 i 의 사용효율은 $q_i = (T_i / \sum T_i)$, $(\sum_{i=1}^N q_i = 1)$ 로 정의한다.

FOM 기준의 성능 평가를 그림 6에서 8까지 도시 하였다. 기존 CDMA 시스템의 페루프 전력 제어 방식과 게임 이론을 적용한 전력 제어 방식을 비교하였으며 100번의 다른 경우를 발생시켜 신뢰성을 높였다. 전력 대비 처리량을 나타내는 FOM1, 2에서 페루프 전력 제어 방식과 비교하여 큰 값을 보이는 것을 알 수 있다. FOM3은 페루프 전력 제어 방식의 평균

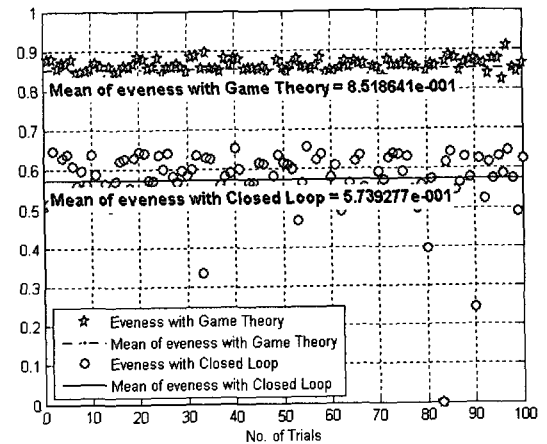


그림 9. 형평성 비교
Fig. 9. Comparison of fairness.

이 더 높은 값을 가지고 있으나 최대값과 최소값의 편차가 게임 이론을 적용한 전력 제어 방식보다 매우 큼을 알 수 있다.

그림 9에 페루프 전력 제어와 게임 이론을 적용한 전력 제어의 형평성 평가를 도시하였다. 100번의 게임을 시도했을 때 각 게임에서 게임 이론을 적용한 전력 제어 방식이 균등한 상태를 나타내는 1에 가까운 평균값을 가짐으로써 기존 페루프 전력 제어 방식 보다 더 우수한 형평성을 보인다. 즉 게임 이론을 적용한 전력 제어 방식이 무선 자원을 여러 사용자에게 더 균등한 상태로 할당하고 있는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

각 단말기들은 자신의 사용효율을 최대로 만드는 전력값을 선택하면서 패널티 항에 따라 다른 사용자에게 간섭이 크게 되면 자신의 송신 전력을 줄이는 단계를 반복하게 된다. 그러면서 전체 단말기는 각각의 최적화에 이르며 동시에 네트워크 효율의 최적화도 이루게 된다. 전력 제어 값의 변화가 거의 없으면 내쉬 균형에 이른 것으로 보고 게임을 종료한다.

본 논문은 게임 이론을 전력 제어 방식에 적용하여, FOM과 Shannon의 균등도 지수를 통해 시스템의 성능을 비교하였으며 기존의 CDMA 시스템의 전력 제어 방식인 페루프 전력 제어 방식보다 전력량 대비 처리량은 물론, 형평성에서도 월등한 성능을 가짐을 입증하였다. 또한 이를 이용하여 CR의 여러 다양한 분야에서도 확장 적용 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] Nan Feng, "Joint network-centric and user-centric radio resource management in a multicell system", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 7, pp. 1114-1118, 2005.
- [2] Samir Ginde, James Neeel, and R. Michael Buehrer, "Game theoretic analysis of joint link adaptation and distributed power control in GPRS", *IEEE Trans. Veh Technol.*, vol. 2, pp. 732-737, 2003.
- [3] Samuel C. Yang, *CDMA RF System Engineering*, Artech House, 1998.
- [4] Jhong Sam Lee, Leonard E. Miller, *CDMA System Engineering Hand Book*, Artech House, 1998.
- [5] Samir V. Ginde, "A game-theoretic analysis of link adaptation in cellular radio network", *Virginia Tech*, May, 2004.

황 인 관



1979년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 6월: Polytechnic University, EE., Dep. (공학박사)
 1997년 3월: 한국전자통신연구원 위성망 연구실장 책임연구원
 1997년 3월~현재: 충북대학교 전

기전자컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] WiBro, UWB, RFID, Cognitive Radio

조 해 근



2006년 2월: 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 (공학사)
 2006년 3월~현재: 충북대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] Cognitive Radio, OFDM, RFID

이 령 경



2006년 2월: 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 (공학사)
 2006년 3월~현재: 충북대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] Cognitive Radio, MIMO, UWB

임 연 준



2006년 2월: 충북대학교 전기전자컴퓨터 공학부 (공학사)
 2006년 3월~현재: 충북대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] RFID, UWB, MIMO, 디지털 통신

고 은 경



2006년 2월: 충북대학교 전기전자
컴퓨터공학부 (공학사)

2006년 3월~현재: 충북대학교 전
파공학과 석사과정

[주 관심분야] MIMO, UWB, Cog-
nitive Radio

송 명 선



1984년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학사)

1986년 2월: 충남대학교 전자공학
과 (공학석사)

1986년 1월~현재: 한국전자통신연
구원 인지무선연구팀장

[주 관심분야] Cognitive Radio, 밀리

미터파 시스템